

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Helge Drumm
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Th. Frank / M. Lotz / T. Hackel / R. Theska / G. Höhne

Extremer Leichtbau von Messspiegeln für die interferometrische Positionsmessung

ABSTRACT

In einachsigen und mehrachsigen Positioniersystemen hoher Genauigkeit kann die Position des Abtriebsgliedes interferometrisch gemessen werden. Dabei ist üblicherweise das Laserinterferometer gestellfest und der Reflektor am bewegten Positioniertisch angebracht. In mehrachsigen Systemen führt dies zu großen Abmessungen der Messspiegel. Da die Genauigkeit von der Stabilität der Reflektoren abhängt werden diese in einer massiven und meist monolithischen Bauweise ausgeführt. Dadurch entstehen Spiegel mit einer großen Masse. Durch eine Reduzierung der Masse können die dynamischen Eigenschaften des Positioniertisches deutlich verbessert werden. Es wird ein werkstofftechnischer Ansatz verfolgt, bei dem durch eine geeignete Gestaltung und Ausführung die Masse reduziert und gleichzeitig die Genauigkeit gehalten werden kann.

Einleitung und Stand der Technik

Die interferometrische Messung der Position soll anhand eines zweiachsigen Positioniersystems erklärt werden (Abb. 1). Durch ein geeignetes Antriebs- und Führungssystem wird ein Abtriebselement in einer Ebene translatorisch bewegt. Die Bewegungsachsen sind in der Regel senkrecht zueinander und werden als X- und Y-Achse bezeichnet. Die Positionsmessung erfolgt direkt am Abtriebselement durch zwei Planspiegelinterferometer.

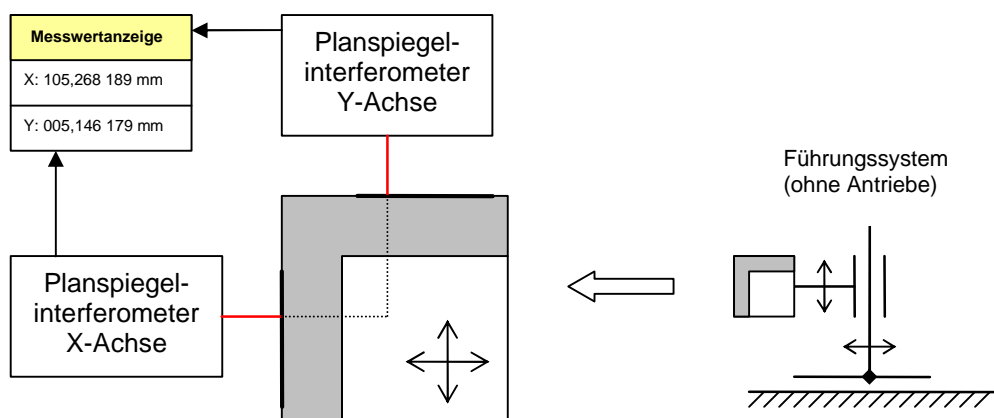


Abb. 1: Messprinzip eines X-Y-Positioniersystems

Dieses Prinzip kann auch für dreiachsige Positioniersysteme, welche translatorische Bewegungen im Raum ausführen erweitert werden (Abb. 2).

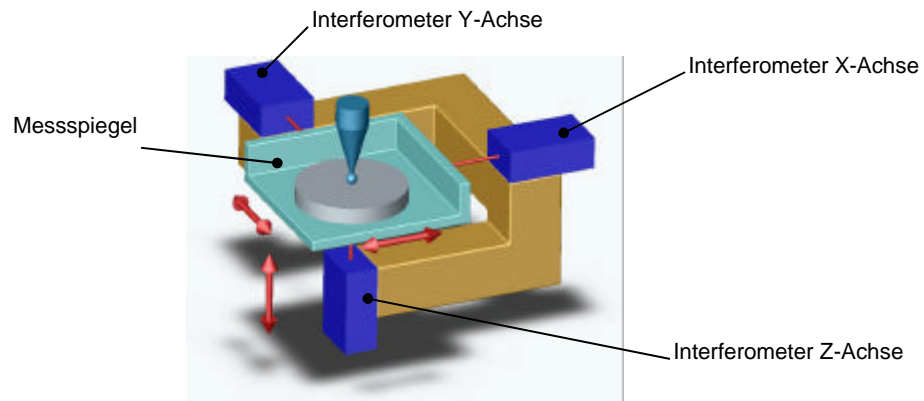


Abb. 2: Messprinzip eines X-Y-Z-Positioniersystems

Es sind verschiedene Ausführungsformen für verschiedene Messaufgaben bekannt. Diese sind meistens als monolithische Blöcke mit Aussparungen aufgebaut (Abb. 3).

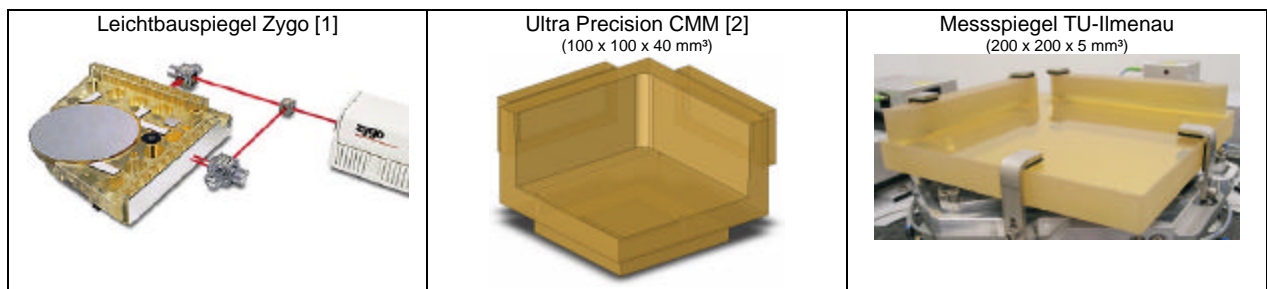


Abb. 3: Ausführungsformen von Messspiegeln

Als Werkstoff wird meist Glas (Quarz) oder ein Material mit einem geringen thermischen Ausdehnungskoeffizient wie z.B. Zerodur® verwendet. Die Spiegeloberflächen müssen eine sehr gute Ebenheit besitzen, damit Planspiegelinterferometer verwendet werden können.

Masse konventioneller Messspiegel

Das konventionelle Design von Messspiegeln führt zu großen zu bewegend Massen, welche vom Positionierbereich abhängig sind. Für die 3D-Positionierung soll die Zunahme der Masse bei steigenden Bewegungsbereichen in Abb. 4 perspektivisch aufgezeigt werden.

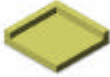
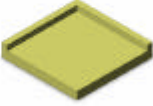
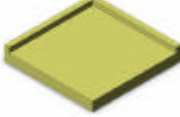
Positionierbereich [x, y, z] mm ³	200 x 200 x 5	350 x 350 x 5	450 x 450 x 5
Spiegelmasse	ca. 7 kg	ca. 23 kg	ca. 42 kg
Gestalt			

Abb. 4: Masse von Messspiegeln in Abhängigkeit vom Positionierbereich

Anforderungen an Messspiegel

Die Messunsicherheit eines Gesamtsystems hängt auch im besonderen Maß von dem Messspiegel ab. Um die angestrebte Messunsicherheit von deutlich unter 50 nm bei einem Positionierbereich von $200 \times 200 \times 5 \text{ mm}^3$ zu realisieren bestehen folgende Forderungen:

- hohe Stabilität bezüglich thermischen Einflüssen,
- hohe mechanische Steifigkeit,
- geringe statische und dynamische Deformation,
- hohe optische Qualität der Spiegelflächen (Ebenheit, Topographie, Rauheit, Reflektivität),
- Winkeltreue und Abstandstreue der Spiegelflächen zueinander,
- geringe Masse.

Werkstofftechnischer Ansatz

Ein Ansatz besteht in der Auswahl und Kombination von geeigneten Werkstoffen zum Aufbau eines solchen Messspiegels. Um eine geringe Masse in Verbindung mit einer hohen Steifigkeit zu erzielen ist anzustreben, einen Werkstoff mit einem geringen Verhältnis aus Dichte und E-Modul auszuwählen. Gleichzeitig soll das Verhältnis aus thermischen Ausdehnungskoeffizient und thermischer Leitfähigkeit ebenfalls gering sein. Die folgende Tabelle (Tab. 1) gibt einen vergleichenden Überblick über mögliche Werkstoffe, die auch technologisch für die Herstellung von Messspiegeln geeignet sind.

Tab. 1: Vergleich geeigneter Spiegelwerkstoffe [3, Auszug]

	Zielstellung	Al	Si	ULE [®]	Zerodur [®]
Dichte [kg/m ³]	gering	2.700	2.330	2.210	2.530
E-Modul [GPa]	hoch	68	131	67	91
therm. Ausdehnungs- koeffizient [$10^{-6}/K$]	niedrig	22,5	2,6	0,03	0,05
therm. Leitfähigkeit [W/m*K]	hoch	167	148	1,31	1,64
mech. Bearbeitung mit Diamantwerkzeugen	gut	gut	gut	mäßig	mäßig
Aufwand zum Polieren	gering	mittel	gering	gering	gering
Kosten	€	€	€€	€€	€€

Neben Zerodur[®] als Standardwerkstoff für Mess- und Teleskopspiegel ist Silizium aufgrund seiner hervorragenden mechanischen Eigenschaften und sehr guten Wärmeleitfähigkeit ein geeigneter Werkstoff. Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist allerdings bei diesem Werkstoff zwei Zehnerpotenzen schlechter als bei Zerodur[®]. Aufgrund der sehr guten Wärmeleitfähigkeit sind jedoch die zu erwarteten Temperaturgradienten in einem Messspiegel aus Silizium gering. Somit kann durch Messung der Temperatur auf die thermische Dehnung geschlossen werden.

Kombination aus Silizium und Zerodur

Aufgrund des relativ ungünstigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten ist es nicht sinnvoll, einen monolithischen Messspiegel gemäß Abb. 2 aus Silizium aufzubauen. Allerdings lassen sich aus der Kombination eines Grundgestells, welches eine geringe thermische Dehnung und damit eine stabile Relativlage zwischen den Messspiegeln realisiert in Verbindung mit Spiegelementen aus Silizium die jeweiligen Vorteile beider Materialien sinnvoll nutzen (Abb. 5).

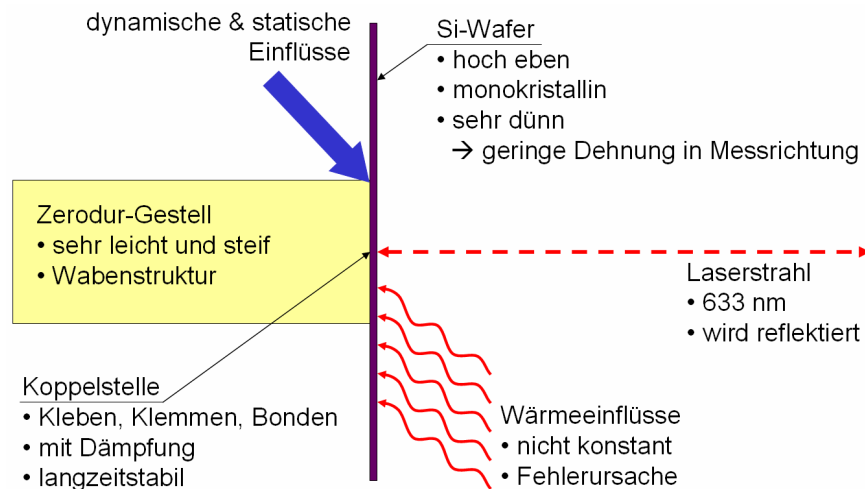


Abb. 5: Konzept für Messspiegel mit Siliziumspiegelflächen

Für den Aufbau eines Messspiegels, der die gleichen Funktionen wie der in Abb. 2 gezeigte realisieren kann gibt es verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten. Eine Variante ist in Abb. 6 dargestellt. Mit diesem Aufbau kann die Masse bezüglich einer monolithischen Ausführung aus Zerodur® um ca. 80 bis 85% reduziert werden.

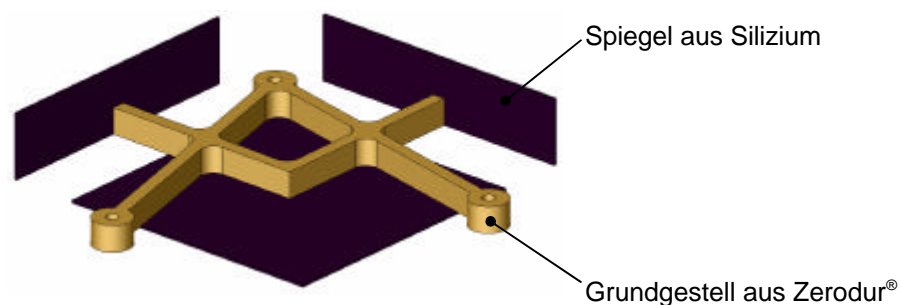


Abb. 6: 3D-Messspiegel aus der Kombination von Silizium und Zerodur®

Ausführung der Fügestelle und Untersuchung des Bimetalleffektes

Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten kommt es bei Temperaturschwankungen zur Deformation des Siliziumspiegels. Durch eine geeignete Gestaltung der Koppelstelle zwischen Silizium und Zerodur® kann diese minimiert werden. Dazu wurden zunächst Untersuchungen mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt. Es wurde von einer runden Siliziumscheibe mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Dicke von 2 mm ausgegangen. An dieser ist mittig ein Zylinder aus Zerodur® angebracht, der einen Durchmesser und eine Höhe von jeweils 30 mm besitzt. Der eingeprägte Temperaturunterschied im statischen

Gleichgewichtszustand beträgt 5 Kelvin. An der Koppelstelle ist es sinnvoll, eine höhere Netzdichte zu wählen. Die Modellierung und Berechnung erfolgte mit der Software COSMOS Works. Dabei wurde zunächst folgende Ergebnisse ermittelt (Abb. 7).

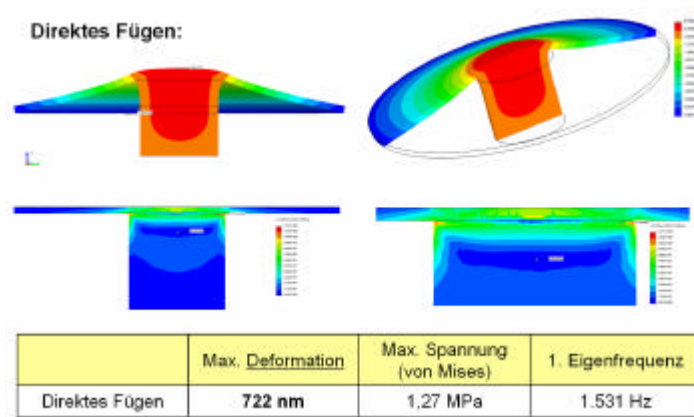


Abb. 7: FEM-Modellierung – Ergebnisse bei 5 K Temperaturunterschied

Durch Modifikationen der Geometrie lässt sich die Deformation minimieren. Hierzu wurden verschiedene Formen und Koppelstellen untersucht (Abb. 8).

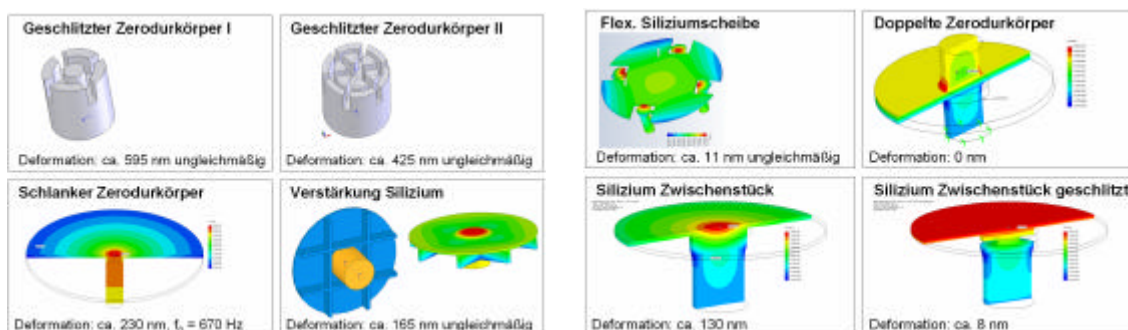


Abb. 8: FEM-Untersuchungen verschiedener Geometrien

Bei den Untersuchungen wurde ausschließlich die Deformationen der Siliziumscheibe ermittelt. Der Offset einer zusätzlichen thermisch induzierten Änderung der Dicke wurde eliminiert. Im Ergebnis lässt sich feststellen, dass beim direkten Fügen unter den oben genannten Randbedingungen eine Deformation von 722 nm auftritt. Durch Einführen eines geschlitzten Zwischenstück, welches ebenfalls aus Silizium ist, kann die Deformation auf ca. 8 nm, also ungefähr 1% des Ausgangswertes reduziert werden. Aufgrund der sehr guten Wärmeleitfähigkeit von Silizium treten innerhalb der Siliziumteile nur geringe Temperaturgradienten auf. Deshalb kann man die zusätzliche Längen- bzw. Dickenänderung durch Messung der Temperatur an dem Silizium bestimmen und entsprechend korrigieren.

Experimentelle Umsetzung

Um dieses Konzept umzusetzen besteht der erste Schritt darin, die Koppelstelle zwischen Silizium und Zerodur[®] experimentell zu untersuchen. Dazu wurden Proben angefertigt, welche eine Geometrie ähnlich wie in Abb. 7 besitzen. Die Koppelstelle wurde in unterschiedlichen Geometrien und Fügeverfahren ausgeführt. Die Deformation der Siliziumscheiben wird in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur gemessen. Das Ziel besteht darin, sowohl eine optimale Koppelstelle als auch optimales Fügeverfahren zu finden und gleichzeitig die FEM-Modelle zu evaluieren. Im zweiten Schritt soll dann die Haltbarkeit der Verbindung gegenüber dynamischen Belastungen untersucht werden. Zur Zeit liegen noch keine verlässlichen Messwerte vor, deshalb wird hier auf die Veröffentlichung der bisherigen Messwerte verzichtet.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Es wurde neues Konzept für Messspiegel zur interferometrischen Messung auf der Basis von Silizium in Verbindung mit einem Grundgestell aus Zerodur[®] vorgestellt. Dabei werden die jeweiligen Vorteile der Materialien zusammengeführt und nutzbar gemacht. Erste Untersuchungen mit der Finiten-Elemente-Methode haben die erwarteten Eigenschaften bestätigt und führten zu einem Ansatz, mit dem die ursprüngliche thermisch induzierte Deformation auf ca. 1% reduziert werden kann. In einem nächsten Schritt werden die Eigenschaften der Koppelstelle zwischen Silizium und Zerodur[®] experimentell bestimmt, es liegen jedoch noch keine verlässlichen Messergebnisse vor. Wenn diese Ergebnisse positiv ausfallen kann dann ein Gesamtentwurf für einen solchen Spiegel erstellt und experimentell umgesetzt werden.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Zygo Corporation, "Displacement Measuring Interferometer Systems", www.zygo.com (2005-02-22)
- [2] T. Ruijl, "Ultra Precision CMM: Design, Calibration and Error Compensation", *Ponsen & Looijen* (2002)
- [3] David Content, "Silicon Mirrors for UV-optical Space Telescopes", NASA GSFC

Autorenangabe(n):

Dipl.-Ing. Thomas Frank ¹
Dipl.-Ing. Markus Lotz ²
Dipl.-Ing. Tobias Hackel ¹
Prof. Dr.-Ing. René Theska ¹
Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Höhne ²
TU Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
¹ Fachgebiet Feinwerktechnik
² Fachgebiet Konstruktionstechnik
PF 10 05 65
98684 Ilmenau
Tel.: +49 / (0) 36 77 / 69 – 38 26
Fax.: +49 / (0) 36 77 / 69 – 38 22
thomas.frank@tu-ilmenau.de